

Рационализация технологических, конструктивных и архитектурных решений трубобетонных конструкций на примере колонн высотных зданий

А.В. Резван, М.А. Колотиенко

Донской государственной технической университет

Аннотация: в работе представлен анализ введенных в эксплуатацию объектов, в каркас которых включены колонны трубобетонного типа. Отмечены прогрессивные решения в области минимизации воздействия недостатков конструкций данного типа на несущую способность и эффективные показатели применения; определены перспективы исследований в области повышения адгезионной составляющей совместной работы бетонного ядра и обоймы. На базе проведенного анализа составлен перечень рекомендуемых мероприятий по повышению технологической рациональности устройства трубобетонных колонн, совершенствованию конструктивных особенностей стыка колонны с сопрягаемыми элементами каркаса.

Ключевые слова: трубобетон, сталежелезобетонная конструкция, трубчатое сечение, несъемная опалубка, стальная обойма, бетонное ядро, адгезия материалов, боковое обжатие, каркасное здание, строительство в условиях Севера, монолитное строительство.

За счет возможностей многоцелевого использования, трубобетонные конструкции (ТБК далее) сегодня вызывают значительный интерес к изучению их потенциала. В России появление элементов данного типа определяется их первоначальным внедрением в конструктив мостовых и дорожных сооружений. В формообразование объектов мостостроения решающими элементами являются конструкции, обеспечивающие нужный пролет полотна, которые, помимо прочего, должны отвечать требованиям функциональной и экономической целесообразности не только самих элементов, но и работ по их изготовлению и монтажу. В качестве оптимального решения в 30х-годах было предложено использование тонкостенных стальных труб, заполненных бетоном, для элементов главных балок (мост через р. Исеть), что позволило снизить стоимость строительства на 20%, а расход стали более чем на 50% [1], при повышении показателей несущей способности и технологической оптимальности. Достижение данных результатов обусловлено «эффектом обоймы»: бетонное ядро работает на восприятие нагрузки и предупреждает потерю устойчивости

стальной обоймы, которая препятствует разрушительным явлениям в теле конструкции благодаря боковому давлению. Однако опыт возведения сооружений данного типа оставил значительный пласт вопросов спорного характера, таких, как: обеспечение сцепления разнородных материалов и возможность их совместной работы; потребность в устранении усадочного фактора или минимизация его воздействия [2]; отсутствие глубоко проработанной и простой в применении нормативной базы, определяющей регламент расчета и возведения зданий и сооружений из трубобетонных элементов; недостаточная изученность сценариев работы конструкций при различных видах загрузки. На сегодняшний день возможности расчетных программных комплексов и обширная международная информационная база определяют рост исследований в области трубобетонных конструкций и, как следствие, переход ТБК из мостостроения в разряд многоцелевых строительных элементов.

Исходя из тенденции стабильного роста объемов монолитного строительства в Российской Федерации, одновременно с повышением интереса к высотному строительству, можно определить данный тип конструкций как перспективный к изучению. Трубобетонные колонны эффективны при сравнительно небольшой гибкости и малом эксцентриситете приложения продольной силы, при этом, могут обладать высокой несущей способностью, при определенной экономии материалов и трудозатрат на устройство, относительно стандартных конструкций [3]. Таким образом определяется обоснованность внедрения ТБК в каркасные системы высотных зданий, следовательно, и актуальность проведения работ по систематизации имеющихся материалов. Примечательна возможность поэтажного уменьшения сечения колонн. Кроме того, особенности технологии устройства элементов из несъемной стальной опалубки с бетонным сердечником определяют их перспективы для строительства зданий и

транспортных сооружений в районах нефтедобычи, условиях Севера [4]. В данной статье нами приведены основные сведения по рационализации применения трубобетонных конструкций, на примере колонн многоэтажных и высотных зданий, в дальнейшем имеются перспективы к изучению объектов мостостроения и аэропортостроения.

Материал предполагается систематизировать по трем аспектам рационализации применения элементов: архитектурному, конструктивному и технологическому, в разрезе чего возможно рассмотреть введенные в эксплуатацию объекты, каркас которых включает трубобетонные колонны.

1. Архитектурные особенности трубобетонных колонн.

Достаточно интересен потенциал ТБК в разрезе архитектурных решений объектов строительства. Так в г. Санкт-Петербурге (Российская Федерация) при возведении МФЦ «Банк Санкт-Петербурга» были применены армируемые пространственными каркасами колонны в стальной несъемной опалубке, что позволило упростить устройство наклонных вертикальных элементов каркаса, образующих вогнутую поверхность фасада.

Возможности ТБК в формообразовании фасадов примечательны и при рассмотрении 600-метровой телебашни «Canton Tower» (Guangzhou, China), которая возведена в форме гиперboloида из закручивающихся в пространстве прямолинейных элементов: колонн и связей. Конструкция башни обусловлена требованиями к восприятию ветровой нагрузки. Обоймы двадцати четырех колонн имеют в основании диаметр порядка 2 м., сведенный к 1,1 м. на верхней отметке, и состоят из листовой стали толщиной 50 мм., которая была доставлена к месту монтажа в виде элементов длиной 3,7 м. Итого для монтажа были транспортированы 10 000 отправочных единиц. Установка в проектное положение включала производство работ по выполнению болтовых соединений с последующей сваркой.

2. Конструктивные особенности трубобетонных колонн.

В целом, уровень индустриальности трубобетонных колонн достаточно высок, степень заводской готовности может быть повышена путем устройства соединительных элементов на обоямах в условиях производства, с учетом сопутствующих издержек при транспортировке. Стыки конструкций следует проектировать с учетом возможностей автоматической сварки для минимизации трудозатрат. Так, например, здание «SEG Plaza» (Guangdong, China), высота которого более 361 м., возводилось из элементов, отправочная длина которых равнялась высоте трех этажей, а диаметр находился в диапазоне 900 - 1600 мм. Стык стальных балок каркаса и колонн выполнен по кольцевому типу, сопряжение жесткое из условия сейсмостойкости здания [5]. Варианты сопряжения трубобетонных колонн различного сечения с балочной системой представлены на рис.1 в трех наиболее оптимальных конфигурациях.

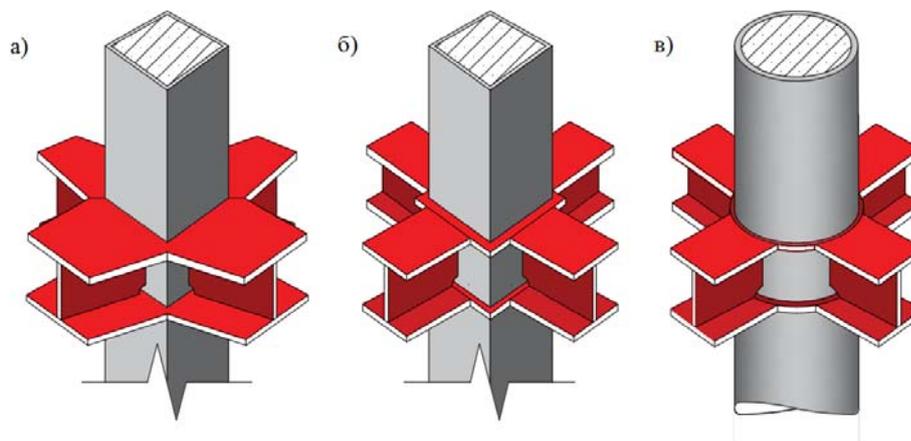


Рис. 1. – Различные конфигурации стыка балочной системы и трубобетонной колонны

Применение жесткой конструкции узла стыка позволяет не применять распространенные анкерные упоры (рис. 2.), для перераспределения усилий между ядром и оболочкой. Вариант, при котором анкерная система размещается исключительно в оголовке, рассматривается в узлах стыка

колонны и перекрытия. Иначе совместная работа ТБК и перекрытия может быть обеспечена устройством соединительных гильз [6], допускающих организацию стыка колонн с балочными и безбалочными перекрытиями, а также сопряжение отправочных элементов многоэтажных ТБК, в том числе, при изменении диаметра их сечения.

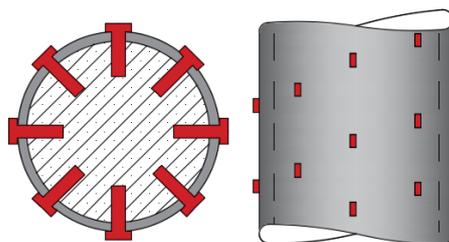


Рис. 2. – Устройство поперечных анкеров в трубобетонной колонне

Наиболее оптимальны к конструированию трубобетонные колонны прямоугольных сечений, однако в таком случае наблюдается снижение эффективности работы на восприятие нагрузок. В качестве примера возможно привести здание повышенной этажности «Ruifeng International Business Building» (Hangzhou, China), каркас которого состоит из колонн квадратного сечения 600x600x22 мм. [7], сопряженных с балочными элементами перекрытия.

Следующий аспект, затрудняющий работу по проектированию трубобетонных колонн,- расчетный, сегодня имеет определенную нормативную базу, а также раскрывается во многих научных работах. Предполагается применение СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования», ознакомление с Eurocode 4 «Проектирование сталежелезобетонных конструкций. Общие правила для зданий», однако, все ещё актуальным является проведение работ по совершенствованию и систематизации методов расчета ТБК.

3. Технологические особенности устройства трубобетонных колонн.

Как говорилось ранее, одним из вопросов, поставленных перед перспективами внедрения ТБК в массовое производство, является снижение прочностных характеристик в виду низкой степень адгезии бетона со стальной оболочкой, обусловленное усадочными деформациями и разницей коэффициентов Пуассона стали и бетона (изначально коэффициент Пуассона бетона ($\nu=0,2$) меньше чем стали ($\nu=0,3$)). Решение представляется возможным путем усовершенствования составов смесей и технологии бетонирования. Повышение монтажной эффективности элементов обеспечивается устройством соединительных гильз.

На данный момент наиболее эффективными приняты две схемы подачи бетонной смеси в смонтированную обойму, условно обозначенные как «напорная» и «гравитационная» (рис. 3).

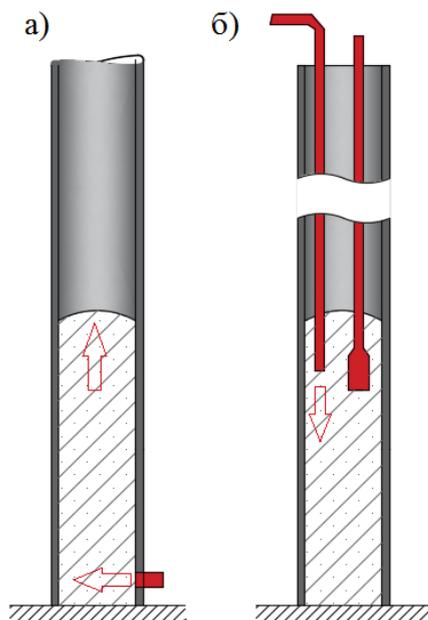


Рис. 3. – Подача бетонной смеси в обойму ТБК: а) напорная; б) гравитационная

Более высокотехнологичной является схема (а): в процессе подачи бетонной смеси бетононасосом, по направлению к верхней отметке на полную высоту элемента, происходит её самоуплотнение. Считается возможным совмещать производство работ по бетонированию перекрытий.

Проектирование работ по укладке смеси в соответствии со схемой (б) определяет производство работ по её уплотнению (внешним или глубинным вибрированием, штыкованием), что подразумевает, в том числе, учет конструктивных возможностей установленных элементов. Следует отметить, что потребность в уплотнении смеси и методы производства работ могут быть иными, в соответствие с проектной документацией объекта, в виду применения особых типов смеси или отличных, от описываемых, технологий. В зависимости от условий окружающей среды проводится уход за набирающей прочность смесью. При отрицательных температурах выполняют обогрев электротепляком.

Примечательно в данном контексте здание «Taipei Financial Center» (Xinyi, Taiwan), бетонирование колонн (общий объем бетона для ТБК составил 2400 м²) в стальной обойме производилось бетононасосами марки «Schwing» (Herne, Germany) на высоте более чем 400 м. Предварительно были проведены испытания применяемой высокоподвижной смеси, воздействия напорного давления подачи на конструкции обоймы.

На основе анализа мирового и отечественного опыта строительства с применением трубобетонных колонн, с учетом различных источников исследования ТБК, нами систематизированы основные аспекты, требующие внедрения инновационных разработок (таблица №1). Стоит отметить, что совершенствование ТБК является весьма актуальной задачей сегодня, разработки в данном направлении требуют: исследования возможности различных бетонных смесей [8-9]; выявления способов обеспечения эффективной совместной работы бетонного ядра и металлической обоймы при различных вариациях загрузки; усовершенствования методов расчета ТБК [10]; оптимизации подбора сечения элементов. В контексте данных задач особенно перспективными кажутся исследования, проводимые авторами цитируемых работ [8-10].

Таблица № 1

Преимущества применения трубобетонных колонн, сопутствующие недостатки и предложения по минимизации их воздействия

	Преимущества	Сопутствующие затруднения	Рекомендации		
1	2	3	4		
1	Сокращение расхода материалов: -бетона до 2 раз; -металла до 1,7 раз; -массы объекта пропорционально	Низкая степень адгезии бетона со стальной оболочкой. Дилатационный эффект.	-Создание предварительного распора в ядре механическим или химическим способом (напрягающие бетоны) [10]; -Применение бетонов, твердеющих под воздействием прессующего давления, что осуществимо только при сравнительно малых длинах конструкций; -Совершенствование методик расчета несущей способности ТБК; -Устройство анкеров		
2	Перспективы достижения высокой несущей способности путем совмещения эффективных сторон работы разнородных материалов (порядка 50%). Повышение сейсмостойкости и огнестойкости конструкций.			Ограничение условий эксплуатации	Дополнительная антикоррозионная защита стальной облоймы
				При использовании фибробетона - дезориентация фибры в ядре	Возможность применения трудоемкого и затратного метода магнитной ориентации фибры
3	Снижение: -трудозатрат до 4 раз; -сроков строительства в 1.5 раза;	Затруднения в производстве работ по внутриплощадочному бетонированию колонн	-Увязка бетонирования колонн с процессом бетонирования плит перекрытий в монолитном строительстве; -Совершенствование методов вибрирования; -Подача смеси бетононасосами		
4	Упрощение выполнения работ в условиях отрицательных температур				
5	Использование облоймы в качестве несъемной опалубки				
6	Повышение отделочной готовности элементов, их архитектурный потенциал	Затрудненное сопряжение трубобетонных колонн со смежными элементами каркаса. Особенно проявляется при устройстве ТБК в	-При заводском изготовлении предусматривается включение вырезов под колонны в пустотных плитах, устройство дополнительных закладных деталей; -Применение облойм квадратного сечения, с учетом снижения работы конструкций на		



1	2	3	4
		обоймах круглого сечения	центральное нагружение от 10% и более; -Включение в узел стыка с ригелем вставок из труб квадратного сечения; -Рационализация узлов стыка, в т.ч. с применением соединительных гильз

Литература

1. Ellis R. A., Billington D. P. Construction history of the composite framed tube structural system // First International Congress on Construction History. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2003. pp. 799-809.
2. Xiao Y., He W. Confined concrete-filled tubular columns // Journal of structural engineering. 2005. №131. 489 p.
3. Krishan A.L., Troshkina E.A., Chernyshova E. P. Efficient Design of Concrete Filled Steel Tube Columns // Procedia Engineering. 2016. №150. pp. 1709 – 1714.
4. Яппаров Г.А. Актуализация типовых проектов сталежелезобетонных пролетных строений мостов с использованием составных трубобетонных главных балок // Вестник гражданских инженеров. 2019. №74. 185 с.
5. Tao Z., Song T., Uy B. Bond behavior in concrete-filled steel tubes // Journal of Constructional Steel Research. № 120. pp. 81-93.
6. Афанасьев А.А., Курочкин А.В. Способ соединения трубобетонных колонн по высоте и перекрытиям. Патент № 2464389 на изобретение: БИПМ, 2012. – № 29.
7. Chan S.L., Teng J.G. Advances in Steel Structures. Amsterdam: Elsevier, 2002. 1141 p.
8. Резван И.В., Резван А.В. О возможности физико-химического регулирования кинетики самоупрочнения НЦ // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1128.



9. Резван А.В. Расширяющееся вяжущее для трубобетонных колонн // Научное обозрение. 2013. №12. С. 95-98.
10. Резван И.В., Маилян Д.Р., Резван А.В. Построение диаграммы «напряжения-деформации» бетона в условиях пассивного бокового обжатия// Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127.

References

1. Ellis R. A., Billington D. P. First International Congress on Construction History. Madrid, 2003, pp. 799-809.
2. Xiao Y., He W. Journal of structural engineering. 2005. №131. 489 p.
3. Krishan A.L., Troshkina E.A., Chernyshova E. P. Procedia Engineering. 2016. №150. pp. 1709 – 1714.
4. Yapparov G.A. Vestnik grazhdanskikh ingenerov (Rus). 2019. №74. 185 p.
5. Tao Z., Song T., Uy B. Journal of Constructional Steel Research. № 120. pp. 81-93.
6. Afanasyev A.A., Kurochkin A.V. Sposob soyedineniya trubobetonnykh kolonn po vysote i perekrytiyam [The method of connecting concrete pipes in height and ceilings]. Patent RF № 2464389, 2012.
7. Chan S.L., Teng J.G. Advances in Steel Structures. Amsterdam: Elsevier, 2002. 1141 p.
8. Rezvan I.V., Rezvan A.V. Inzenernyj vestnik Dona, 2012, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1128.
9. Rezvan A.V. Nauchnoye obozreniye (Rus). 2013. №12. pp. 95-98.
10. Rezvan I.V., Mailyan D.R., Rezvan A.V. Inzenernyj vestnik Dona, 2012, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127.